

文章编号:1007-2780(2018)05-0412-06

温度系数连续可调的带隙基准源电路设计

庄楚楠, 许佳雄*

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要:为了对薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)驱动芯片的驱动电压进行温度补偿以改善 TFT-LCD 的性能,本文基于标准 CMOS(3.3 V)的 chrt35rf 0.35 μm 工艺,设计了一款温度系数可连续调节的带隙基准电压源,其中包括核心电路、运算放大器电路和启动电路 3 个子模块。该电路使用 MOS 晶体管作为可变电阻,通过调节 MOS 栅极电压控制 MOS 漏源等效电阻的连续可变,进而改变电路中的电阻比值,实现带隙基准源的温度系数连续可调。使用 Cadence 的 Spectre 仿真器进行仿真,结果表明,在 $-25\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内,带隙基准源电路的输出电压的正温度系数可连续调节范围为 $156.6\sim 2\,545.0\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$,输出电压的负温度系数的连续变化范围为 $156.6\sim 1\,337.7\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$,输出基准电压变化为 $0.95\sim 2.67\text{ V}$,低频时基准电压的电源抑制比达到 73.13 dB。该电路实现了基准电压从负温度系数向正温度系数的连续可调节,且调节范围较大。

关键词:带隙基准源;温度系数连续可调;PTAT 电流;PNP 晶体管

中图分类号:TN433 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183305.0412

Design of bandgap reference circuit with continuously adjustable temperature coefficient

ZHUANG Chu-nan, XU Jia-xiong*

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to compensate the driving voltage of driver chip of thin-film-transistor liquid crystal display(TFT-LCD) to improve the performance of TFT-LCD, in this paper, based on the standard CMOS (3.3 V) chrt35rf 0.35 μm process, a bandgap reference circuit with continuously adjustable temperature coefficient is designed. The circuit includes three sub-modules of a core circuit, an operational amplifier circuit, and a startup circuit. Using a MOS transistor as a variable resistor, the source-drain equivalent resistance of MOS can be changed continuously by the gate voltage. Then, the temperature coefficient of the bandgap reference can be adjusted continuously by changing the resistance ratio in the circuit. The designed circuit is simulated by the Cadence Specter simulator. The results show that in the working temperature range from -25 to $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, the positive temperature coefficient, negative temperature coefficient, and output voltage are $156.6\sim 2\,545.0\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, $156.6\sim 1\,337.7\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, and $0.95\sim 2.67\text{ V}$, respectively. The power supply rejection ratio(PSRR) of the reference voltage at low

收稿日期:2017-12-05;修订日期:2018-03-09.

* 通信联系人, E-mail: xujiaxiong@gdut.edu.cn

frequencies reaches 73.13 dB. The circuit achieves continuous adjustment of the reference voltage from negative temperature coefficient to positive temperature coefficient. In addition, the adjustment range of temperature coefficient is large.

Key words: bandgap reference; continuously adjustable temperature coefficient; PTAT current; PNP transistor

1 引言

近年来,随着科学技术的发展以及信息时代的到来,液晶显示屏广泛应用于笔记本电脑、手机、电视机显示屏等方面。薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)的性能随其工作温度的变化而发生改变,可以利用温度系数可调节的基准电压源对 TFT-LCD 驱动芯片的驱动电压进行温度补偿,使显示屏在不同温度下能正常工作,以提高显示屏画质^[1],这促使温度系数可调节的带隙基准源电路的发展。

目前已知的温度系数可调节的带隙基准源有两种:一种是通过数字编程的方法对电路中的可调电阻网络进行编程实现不同的电阻比值,从而获得不同的温度系数^[1];另一种是通过数字编程控制 PTAT(与绝对温度成正比)^[2] 电流流过的支路数量改变 PTAT 电流,得到不同的温度系数。但这两种方法都是通过数字编程调节,只能实现温度系数的分级调节而不能实现连续可调,本文将着重针对这一问题设计一款温度系数连续可调的带隙基准源,可更精确地调节基准电压的温度系数以使电路系统获得最佳性能。

本文利用 MOS 场效应晶体管工作在线性区时可等效为可调电阻的特性,通过改变 MOS 晶体管的栅极电压来改变带隙基准源电路的电阻比值,从而实现输出电压温度系数的连续可调节。所设计电路由核心电路、运算放大器电路和启动电路组成。

2 温度系数连续可调的带隙基准源电路设计

2.1 带隙基准源总电路

本次设计的温度系数连续可调节带隙基准源总电路如图 1 所示,由核心电路、运算放大器电路和启动电路三个主要部分组成。

2.2 核心电路

本次设计采用图 1 中间部分所示的带隙基准源核心电路,利用 MOS 晶体管工作在线性区时漏源之间可以等效为电阻的性质^[3],替换传统带隙基准电路中用于调节正温度系数的电阻,再通过 MOS 晶体管的栅极电压调节等效电阻的阻值,从而改变基准电压的温度系数。图 1 所示电路的基准电压 V_{out} 表达式如式(1)所示,基准电压温度系数表达式如式(2)所示^[4-5],式中 V_{BE2} 、 V_{BE1} 、 V_{BE0} 分别为 Q_2 、 Q_1 、 Q_0 的基极-发射极电压, n 是 Q_1 和 Q_0 的集电极电流密度比, I_{PTAT} 是流经 M_0 的电流,与温度成正比, R_{mos} 是 M_0 工作在线性区时的等效电阻, $V_T = kT/q$ 。

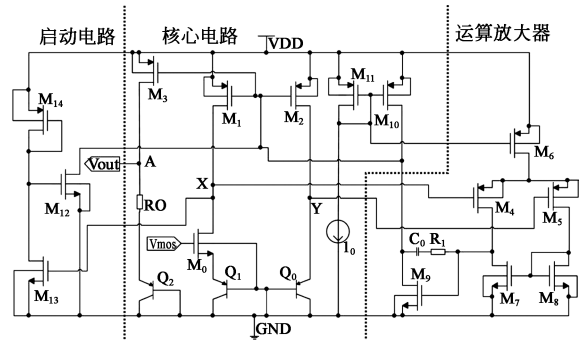


图 1 带隙基准源电路

Fig.1 Bandgap reference circuit

$$V_{out} = V_{BE2} + I_{PTAT} \times R_0 = V_{BE2} + (V_{BE0} - V_{BE1}) \frac{R_0}{R_{mos}} = V_{BE2} + (V_T \ln n) \frac{R_0}{R_{mos}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE2}}{\partial T} + \left(\frac{R_0}{R_{mos}} \ln n \right) \frac{\partial V_T}{\partial T}. \quad (2)$$

从式(2)可以看出,等式右边第一项为负温度系数数量,在此电路中保持不变。等式右边第二项为正温度系数数量,通过改变 R_{mos} 的数值可改变正温度系数数量,从而改变输出基准电压的温度系数。

M_0 的漏源等效电阻 R_{mos} 的表达式为:

$$R_{\text{mos}} = \frac{1}{\mu_n C_{\text{OX}} \frac{W}{L} (V_{\text{mos}} - V_{\text{th}})}, \quad (3)$$

其中: μ_n 为电子迁移率, C_{OX} 为栅氧化层电容, V_{mos} 为 M_0 的栅极电压。从式(3)可以看出, 可通过调节 V_{mos} 改变 R_{mos} , 且 R_{mos} 的值是连续变化的, 因此可以实现基准电压从正温度系数到负温度系数的连续调节。

式(3)成立的条件是 MOS 晶体管 M_0 工作在线性区。 M_0 漏源两端的电压为 V_Y 和 V_X 的差值, 电路中通过运算放大器对节点 X 和 Y 进行严格钳位, 使 X 和 Y 两个节点的电位近似相等, M_0 的漏源电压始终保持着一个很小的值, 约为 50 mV, 因此 M_0 管始终工作在深线性区。

2.3 运算放大器电路

运算放大器是带隙基准源不可或缺的部分, 核心电路结构中节点 X 和 Y 的电位需要使用运算放大器进行严格钳位, 本文设计的运算放大器如图 1 右侧所示。

本次设计采用两级运算放大器结构^[6], 第一级运算放大器采用以 PMOS 作为输入器件的差动对结构, 主要作用是提供运算放大器的增益和有效地抑制温度漂移及噪声。 M_4 和 M_5 是差动对输入器件, M_6 为差动对提供尾电流, 与 M_{11} 构成电流镜结构, 复制偏置电流源 I_0 的电流。第二级运算放大器采用以 NMOS 晶体管 M_9 为输入器件的简单共源级放大电路, 可以增加运算放大器的输出电压摆幅。此外, 在第二级运算放大器的输入和输出之间增加补偿电容 C_0 和调零电阻 R_1 , 提高了运算放大器的相位裕度。

2.4 启动电路

电源上电后, 带隙基准源可能处于正常工作状态或简并工作点, 简并工作点可以是一个稳定工作状态^[7]。因此需要设计一个启动电路确保电路系统进入正常工作状态。

本文设计的启动电路如图 1 左侧所示, 电源上电后, 若系统处于简并工作点, 基准电压 V_{out} 为零, 导致 M_{13} 截止, 而二极管连接的 M_{14} 因没有电流流通也处于截止状态, 因此 M_{12} 的栅极电压为 $V_{\text{DD}} + V_{\text{THP}}$, 这会驱动 M_{12} 开启, 从而把 PMOS 电流镜的栅极电压拉低, 驱动基准源电路的 PMOS 电流镜导通, 并通过 V_{DD} 为运算放大器和核心电路提供电流, 系统开始启动。此时, 产生的基准输出电压拉

高 M_{13} 的栅极电压使其开启, 为 M_{14} 和 M_{13} 选择合适的尺寸, 保持当 M_{14} 和 M_{13} 同时导通时 $V_{\text{DD}} - V_{\text{DS14}} - V_{\text{DS13}} < V_{\text{TH12}}$, 此时 M_{12} 的栅极电压将被拉低, M_{12} 关断, 切断与系统其它部分的联系。

3 仿真结果及分析

本次设计采用 chrt35rf 0.35 μm 的标准 CMOS(3.3 V) 工艺, 使用 Cadence 的 Spectre 仿真器进行电路性能参数的仿真^[8]。

3.1 运算放大器仿真

运算放大器的交流仿真结果如图 2 所示, 低频增益为 65.05 dB, 使用 Spectre 仿真器中的 Calculator 测得相位裕度为 56.77°, 增益带宽积为 5.065 MHz。由此可见运算放大器具有很高的低频增益, 对节点 X 和 Y 具有很好的钳位效果, 相位裕度适中, 电路具有较高的响应速度和良好的稳定性。

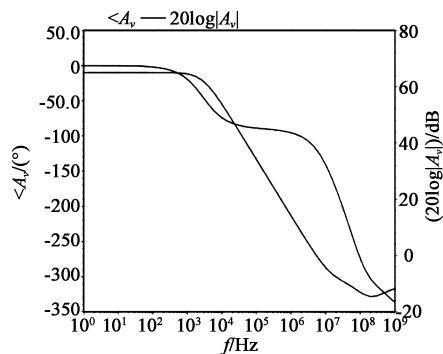


图 2 运算放大器交流仿真

Fig.2 Alternating current simulation of operational amplifier

3.2 带隙基准源仿真

带隙基准源的电源抑制比(PSRR)如图 3 所示, 在低频时, $\text{PSRR} = 73.13 \text{ dB}$, 在频率 1 kHz 处, PSRR 为 67.09 dB, 电路具有较高的电源抑制比。

设定带隙基准源的工作温度变化范围为 $-25 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$, 通过改变 V_{mos} 从而改变基准源的温度系数 T_C 。温度系数 T_C 的计算公式为:

$$T_C = \frac{1}{V_{\text{REF}}} \cdot \frac{V_{\text{REFMAX}} - V_{\text{REFMIN}}}{T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}} \times 10^6. \quad (4)$$

输出基准电压随温度变化的仿真结果如图 4 所示。在图 4(a) 中, 当 $V_{\text{mos}} = 2.07 \text{ V}$ 时, 输出基准电压达到近零温度系数点 156.6 ppm/ $^\circ\text{C}$ (1 ppm=

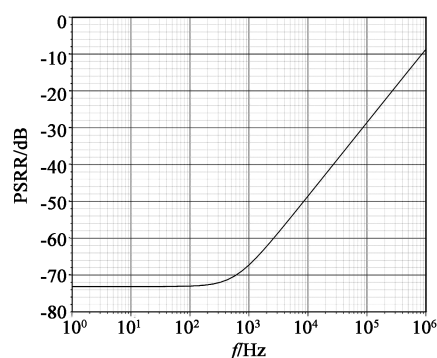


图3 PSRR 曲线
Fig.3 PSRR curve

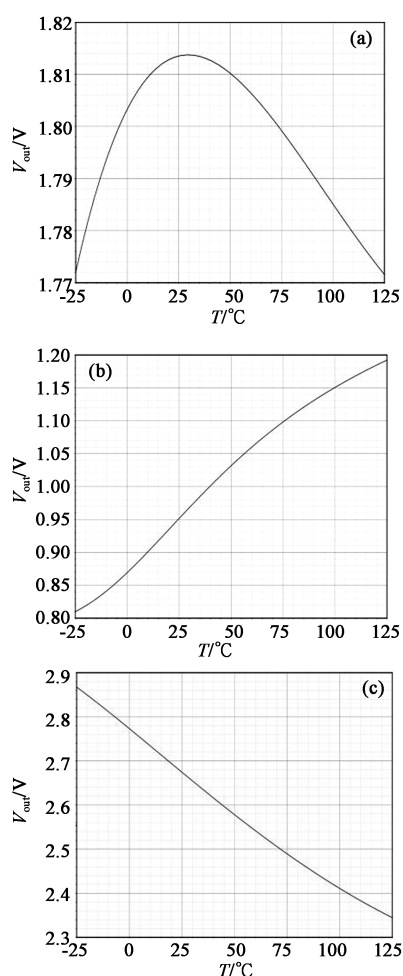


图4 (a)近零温度系数,(b)最大正温度系数和(c)最大负温度系数绝对值时输出基准电压随温度变化曲线

Fig.4 Temperature curves of the output voltage when (a) the temperature coefficient is near-zero, (b) the positive temperature coefficient reaches the maximum, and (c) the negative temperature coefficient reaches the maximum

10^{-6}),此时输出基准电压 $V_{out} = 1.81$ V;如图4(b)所示,当 $V_{mos} = 1.63$ V时,输出基准电压 V_{out} 随着温度 T 升高而增大,因此温度系数为正,此时输出基准电压正温度系数达到最大值 2 545.0 ppm/°C;如图4(c)所示,当 $V_{mos} = 2.60$ V时,输出基准电压 V_{out} 随着温度 T 降低而降低,温度系数为负,此时输出基准电压负温度系数绝对值达到最大值 1 337.7 ppm/°C。

V_{mos} 与温度系数 T_c 的关系曲线如图5(a)所示。将 V_{mos} 从 1.63 V 调节到 2.07 V 时,温度系数 T_c 从 2 545.0 ppm/°C 变化至 156.6 ppm/°C,这是正温度系数调节范围;将 V_{mos} 从 2.07 V 调节到 2.60 V 时,温度系数 T_c 从 156.6 ppm/°C 变化至 1 337.7 ppm/°C,这是负温度系数调节范围。温度系数的可调节范围比参考文献[1]所得结果大,且实现了温度系数的连续可调节。

在调节 V_{mos} 的同时,输出基准电压 V_{out} 也会发生变化,其关系曲线如图5(b)所示。 V_{mos} 从 1.63 V 增大到 2.60 V 时,输出基准电压从 0.95 V 逐渐增大至 2.67 V。通过调节和控制输出基准电压 V_{out} 的幅值可以实现对 LCD 显示屏的显示对比度的控制,还可以用于显示灰度级电压值的调节,从而实现多种颜色的显示。

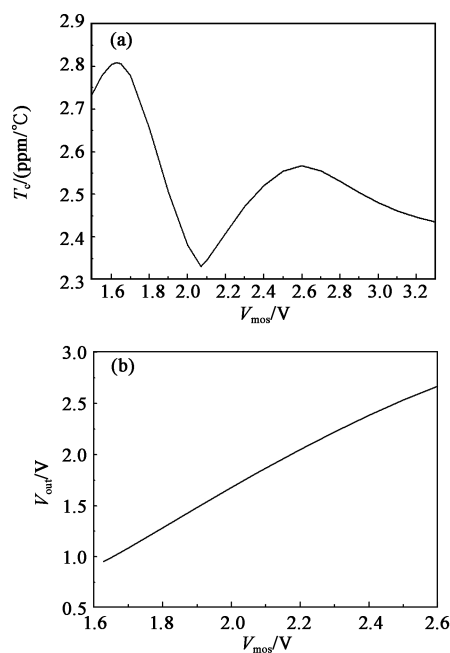


图5 (a)基准电压 V_{out} 与(b)温度系数 T_c 随 V_{mos} 的变化曲线

Fig.5 Temperature curves of (a) V_{out} and (b) T_c

4 版图

本次设计采用 Virtuoso 版图设计软件的交互式编辑方式,对 MOS 晶体管采用了折叠栅结构^[9]以及一维共质心结构^[10]进行匹配布局,对电阻采用了一维共质心结构进行匹配布局,将所有的器件合理布局后,用金属进行布线,版图设计如图 6 所示。

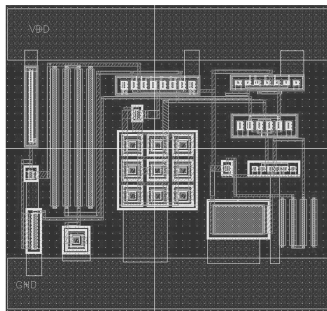


图 6 带隙基准源版图

Fig.6 Layout of bandgap reference

5 结论

本文利用 MOS 晶体管工作在线性区等效于可变电阻的特性,设计了一款温度系数连续可调节的带隙基准源,可降低电路的复杂度。电路可以实现温度系数的连续可调节,在工作温度 $-25 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,输出基准电压的正温度系数可在 $156.6 \sim 2\,545.0\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 范围内连续调节,输出基准电压的负温度系数连续变化范围为 $156.6 \sim 1\,337.7\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$,输出基准电压变化范围是 $0.95 \sim 2.67\text{ V}$ 。该电路可应用于 TFT-LCD 显示屏的驱动芯片,通过调节显示屏温度系数使 TFT-LCD 显示屏在不同温度下能正常工作,提高分辨率,还可以通过调节输出基准电压以调节 TFT-LCD 显示屏的灰度,在 LCD 显示领域有广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] 习江艳,魏廷存. 温度系数可调的基准电压产生电路研究与设计[J].液晶与显示,2006,21(5): 574-578.
XI J Y, WEI T C. Study and design of reference voltage generator with adjustable temperature coefficient[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(5): 574-578. (in Chinese)
- [2] 仇岩,魏廷存,王佳,等. 一种基于控制 PTAT 电流的温度系数可调带隙基准源[J].液晶与显示,2010,25(1): 106-109.
CHOU Y, WEI T C, WANG J, *et al.* Bandgap reference with adjustable temperature coefficient based on controlling PTAT current[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(1): 106-109. (in Chinese)
- [3] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础(第 5 版)[M].北京:高等教育出版社,2015:24-42.
TONG S B, HUA C Y. *Fundamentals of analog electronic technology (The fifth edition)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 24-42. (in Chinese)
- [4] 辛新鹏,李冬梅,王志华. CMOS 带隙基准源研究现状[J].微电子学,2008,(01):57-62.
XIN X P, LI D M, WANG Z H. Research status of CMOS bandgap reference[J]. *Microelectronics*, 2008, 38(1): 57-62. (in Chinese)
- [5] 毕查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M].西安:西安交通大学出版社,2003:309-324.
Behzad Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 309-324. (in Chinese)
- [6] 李琪,包盼盼,徐学成. CMOS 两级运放的设计[J].硅谷,2011,11(1): 67.
LI Q, BAO P P, XU X C. Design of CMOS two-stage amplifier[J]. *Silicon Valley*, 2011, 11(1): 67. (in Chinese)
- [7] 李伟,唐亮,苗澎. 一种输出电压可调带隙基准源设计[J].电子元件与材料,2015,34(1): 80-83.
LI W, TANG L, MIAO P. Bandgap reference design with adjustable output voltage[J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(1): 80-83. (in Chinese)
- [8] 陈毓颖,杨丽琼,王统. CMOS 模拟集成电路设计与仿真实例——基于 Cadence ADE[M]. 北京:电子工业出版社,2013: 24-42.
CHEN C Y, YANG L Q, WANG T. *Design and simulation example of CMOS analog integrated circuit——Base on Cadence ADE*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 24-42. (in Chinese)

- [9] 马林. 基于 CMOS 工艺的带隙基准源设计[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.
MA L. Design of bandgap reference based on CMOS technology[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2015. (in Chinese)
- [10] HASTINGS A. 模拟版图的艺术[M].第2版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 237-242.
HASTINGS A. Theart of analog layout[M]. The Second Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 237-242. (in Chinese)

作者简介:庄楚楠(1995—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要从事模拟集成电路设计和半导体光电器件方面的研究。

E-mail: zcn574918628@126.com

许佳雄(1984—),男,广东揭阳人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事半导体光电器件和集成电路设计等方面的研究。E-mail: xujiaxiong@gdut.edu.cn